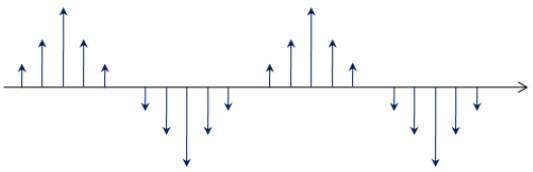
07 CM 실패-광전효과

인생에 두려워할 것은 아무것도 없다.
이해의 대상일 뿐이다.
- 마리 퀴리 -

▌아인슈타인의 사고실험

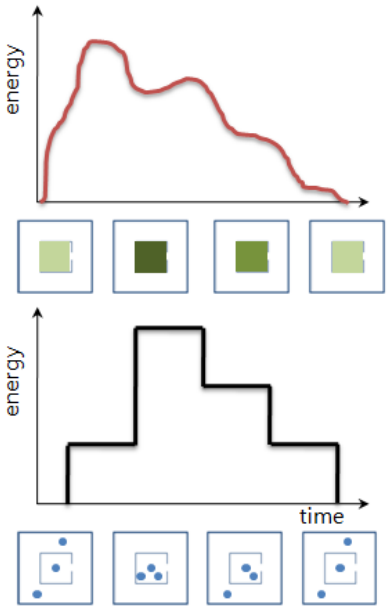
보수적인 플랑크는 당시의 볼츠만 통계역학과 맥스웰 전자기학에 만족해 있었으며, 양자 불연속 개념을 도입했지만 부정하고자 하였다. 또한 아인슈타인의 상대성이론은 극찬하면서도 정작 자신의 가설과 관련이 깊은 광양자설은 깊은 회의를 나타냈었다. 정작 그랬던 그는 흑체복사 현상을 설명하기 위해 $E=nh\nu$라는 에너지의 양자화를 제안하였다. 자신도 파동으로 생각하던 빛이 불연속적인 에너지 단위로 이루어졌다는 것에 심한 괴리감에 빠져있었다. 이는 파동에너지가 연속적으로 존재하지 못하기 때문에 진폭도 불연속이어야 한다는 말이 되고, 그러면 더 이상 연속적인 파동



|불연속적인 파동의 진폭|

의 특성이 사라진다는 말이 된다. 이는 빛이 파동이라는 고전물리학 개념으로는 이해하기 어려운 괴이한 현상이었다. 이에 관한 이해 방법을 제시한 사람이 바로 아인슈타인이다.

아인슈타인은 사고실험(Gedanken experiment)을 즐겼는데, 가설을 먼저 세운 뒤 머릿속으로 그러한 진리를 생각만으로 검증하여 결론에 도달하는 연역적 방법을 이용하였다. 즉 상향식(bottom-up)인 귀납적 방법이 아닌 하향식(top-down)의 생각법이다. 예를 들자면, 사과가 떨어지는 것을 보고 지구가 물체를 잡아당기는 힘이 있다는 뉴턴적 사고가 아닌, 지구라면 물체를 잡아당기는 힘이 있어야 한다는 가설적 결론을 먼저 세운 다음에 이를 증명하기 위해 사과가 떨어지는 것을 보여주는 것이다.



|불연속성에 관한 사고실험|

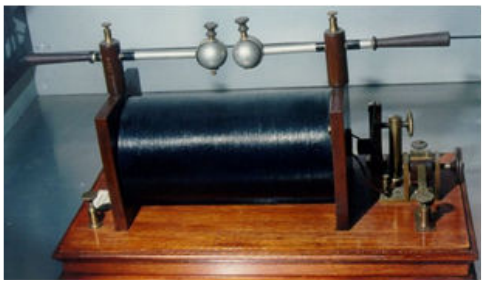
아인슈타인은 에너지는 양자화 되어 있어서 순식간에 에너지가 전달될 수 있다고 결과론적 가설을 세웠다. 그리고 그 가설을 증명하기 위해 흑체 내부에 동공이 있는 작은 상자를 고안하고, 외부에서 열에너지를 공급하여 복사에 의해 에너지가 내부의 작은 상자로 들어갈 것이라고 생각했다. 즉, 연속적인 에너지라면 시간에 따른 내부 상자의 에너지 또한 연속적인 값이 되겠지만, 실제로는 불연속적인 값을 보이기에 빛 에너지의 이동이 순식간에 발생해야 한다는 것이다. 따라서 빛 에너지는 공과 같은 형태의 에너지 전달을 이루어야

하고, 이때 그 공이 지닌 에너지는 $h\nu$이며 공의 개수가 n이 된다는 것이다. 이로서 빛 에너지를 입자화 된 공처럼 생각함으로써 에너지 전달의 불연속성을 이해하고자 하였다.

▌광전자의 발견

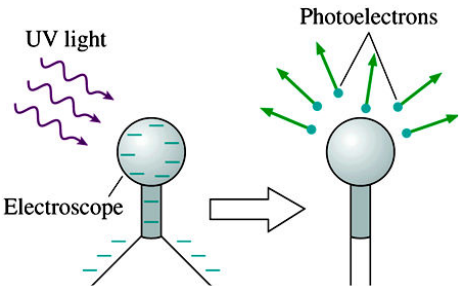
알루미늄 금속 판에 빛을 비추면 반짝거리는 것은 단순히 빛을 반사해서만이 아니라 외부에서 받은 전자기파에 의해 유도된 광전자(photoelectron)가 튀어나오는 것으로 설명된다. 이는 헤르츠(Heinrich Hertz, 1857-1894)에 의해 발견된 광전효과(photoelectric effect, Hertz effect)와 아인슈타인이 설명한 광양자설에 기반을 두고 이해할 수 있다.

1887년 전자기 복사에 관한 연구를 진행중이던 헤르츠는 우연한 기회에 광전효과를 발견하게 된다. 양끝이 연결된 두 개의 금속구를 약간 띄어 놓은 상태에서 전위차에 의해 스파크를 발생할 수 있도록 장치를 만들었다. 그런데 스파크를 발생시키는 금속구 사이에 UV를 쪼이면 스파크 발생에 필요한 최소 전압값이 줄어드는 것을 관찰하였다. 이는 빛이 금속구들로부터 맞은편 금속구로 전하 방출을 용이하게 하였다는 것을 말한다. 도체 내의 자유전



|광전효과를 관찰한 헤르츠 실험장치|

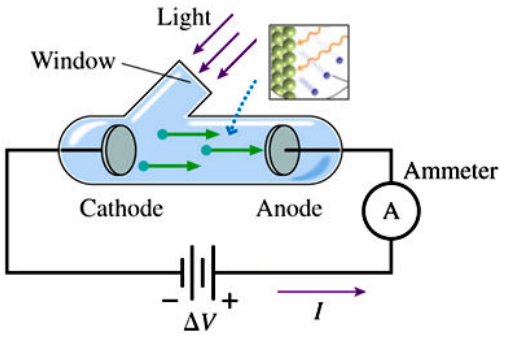
하들은 표면의 에너지 장벽에 의해 외부로 빠져 나가지 못하지만, 하전된 전하들은 이 장벽을 넘기 위해 다양한 방법으로 에너지를 확보할 수 있다는 것이 잘 알려져 있었다. 따라서 헤르츠 실험에서는 빛을 이용한 것뿐이라는 것이었다.



|톰슨의 광전자 관찰 실험|

헤르츠 실험 전인 1883년, 에디슨(Thomas Edison, 1847-1931)은 물질에 고열로 가열할 때 열에너지가 금속 내의 전자에게 공급되어 열전자 방출(thermoelectronic emission)이 발생한다는 것을 관찰하였다. 따라서 당시 헤르츠의 관찰은 그리 혁명적이지 못했다. 톰슨(Joseph Thomson, 1856-1940)은 하전된 금속 표면에 수은등(UV)을 쪼이면 하전 되어 벌어졌던 금속판 사이에 척력이 사라지는 것을 관찰하여 광전자가 발생함을 알았다. 톰슨은 또한 1897년에 음극선 실험을 통해 음전하를 띤 미립자(corpuscle)의 질량과 하전량을 알아내었다. 훗날 그 미립자가 바로 전자(electron)라고 칭하게 되었다.

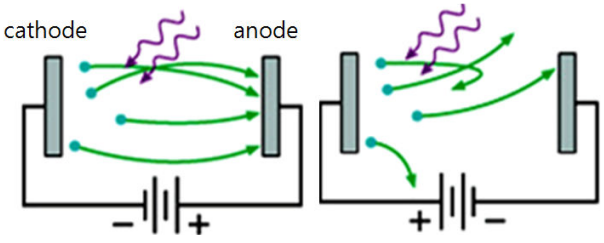
헤르츠의 광전효과 발견 후 10년 뒤인 1897년, 그의 조교였던 레너드(Philipp Lenard, 1862-1947)는 열전자 방출에 관한 생각에서 빛과 전자의 방출의 관계까지 깊이 있



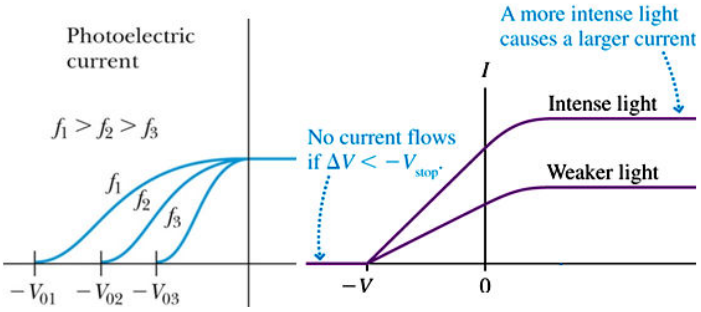
|레너드의 광전자 관찰 실험|

게 실험하여, 광전자를 실험적으로 계측하였다. 떨어져 있는 두 개의 금속판에 전류계를 장착하여 빛의 유무에 따른 전류량 변화를 관찰하였다. 진동수가 크고 파장이 짧은 빛을 쪼일 때 전류가 흘렀으며, 이는 원거리에서 전자가 이동했다는 것을 의미했다. 이로서 서로 떨어져 있는 금속판내 전자가 빛에 의해서 쉽게 방출될 수 있음을 알게 되었고 이를 광전자로 인식하였다.

레너드 실험에서 모든 광전자가 반대 금속판으로 이동하는 것은 아니다. 외부 전압의 방향에 따른 전류값 변화 효과가 존재한다. 전류의 방향이 반대라면, 금속표면에서 발생한 광전자는 반대편으로 전달되지 못하고 공간으로 방출되어 전류값이 흐르지 않게 된다. 또한 음의 전압을 인가하면 모든 전류의 흐름을 정지시킬 수 있다는 것을 알게 되었다. 이때 필요한 음의 전압을 저지전압(V_{stop}, stopping potential)이라고 한다. 빛의 세기에 무관하게 진동수만 같다면 저지전압은 동일하지만 발생된 전류값은 세기에 비례한다. 진동수가 커지면 발생된 광전자가 지닌 단일 전자



|전압의 방향에 따른 광전효과|

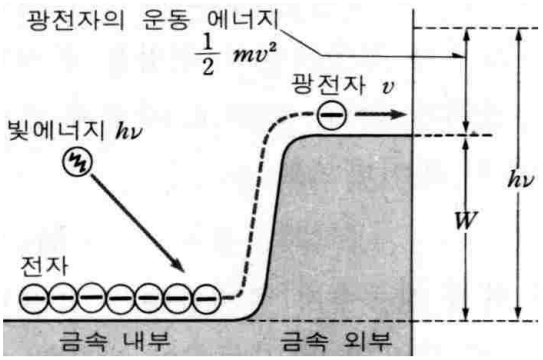


|진동수와 세기 변화에 따른 저지전압|

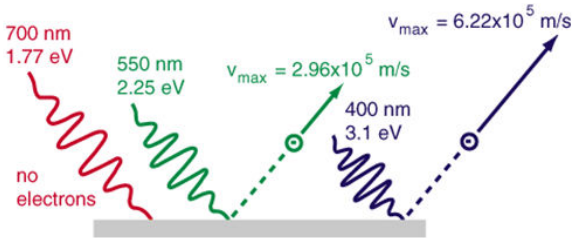
에너지가 크기 때문에 반대 전극으로 가려는 힘을 저지하기 위해서 더 큰 저지전압을 필요로 한다. 단, 진동수가 커진다고 해서 전류값의 변화는 없다.

▌광전효과

태양에너지 발전에 사용되는 태양전지(solar cell)와 광다이오드(photodiode)는 모두 광전효과를 이용한다. 금속 물질이 고유의 특정 파장보다 짧은 파장을 지닌 고에너지의 전자기파를 흡수했을 때 전자를 내보내는 현상으로, 광전효과는 한계 파장이라는 특정 파장이하에서만 가능하다. 그때의 진동수를 한계 진동수(threshold frequency, ν_o)라고 하며 플랑크 상수를 곱하여 전자가 방출되기 위해 필요한 일함수($W=h\nu_o$, work function)가 된다. 빛의 진동수가 한계 진동수 보다 더 크지 않으면



|에너지 준위에 따른 광전효과 설명|



|임계전압이 2 eV인 메탈 K의 광전효과|

빛의 세기가 아무리 강해도 광전자는 방출되지 않는다. 즉, 금속 표면의 전자가 탈출하기 위해서는 전자탈출에 필요한 만큼의 광에너지가 필요하고 이에 특정 진동수 이상에서만 반응하게 된다. 잉여 광에너지는 전자의 운동에너지 형태로 흡수된다. 빛을 파동으로 생각하던 고전물리학에 의하면 파장의 크기에 상관없이 전영역에서 광전자가 방출해야 한다. 따라서 한계 진동수를 지닌다는 것은 고전물리학에 위배되는 현상이었다.

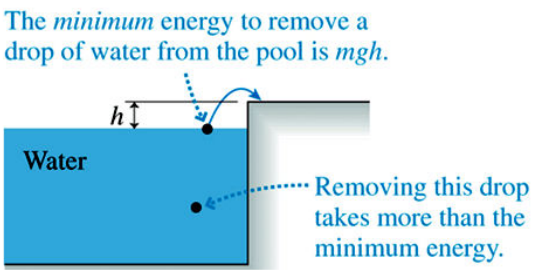
입사광의 세기와 진동수를 변화시키면서 광전효과 변화를 관찰하면 다음과 같다. 입자광의 세기를 증가시키면 튀어나오는 광전자의 수가 증가하는 데 반해, 튀어나온 단일 전자가 지닌 에너지는 세기 증가전과 동일하다. 입사광의 진동수를 증가시키면 튀어나오는 광전자 수는 변함없지만, 광전자가 가진 에너지는 증가한다. 즉 더 빨리 속도로 튀어 나오게 된다. 실험결과를 해석하면, 빛의 강도를 증가 시키더라도 진동수는 고정된 상태이므로 단일 전자에너지는 변하지 않는다. 따라서 진동수는 광전효과로 인해 발생되는 단일 전자의 에너지를 변화시키며, 세기는 발생된 전자수를 증가 시킨다고 할 수 있다.

▌CM의 광전효과 해석

고전물리학 관점에서 입사광의 세기와 진동수 변화에 관한 실험을 해석하면 도저히 이해할 수 없다. 즉 입사광의 세기가 증가한다는 것은 진폭을 증가시키는 것이고, 입사광의 증가된 에너지만큼 단일 전자에

너지가 커져야 한다. 또한 진동수가 증가했다는 것은 파장이 짧아졌다는 것으로, 진폭은 그대로이므로 튀어나오는 전자의 에너지는 유지하되 잔물결효과로 인해 튀어나오는 전자수는 감소해야 한다. 여기서 잔물결효과란 파장이 짧다보니 마루와 마루사이 간격이 짧아서 마루 위에 입자가 그냥 떠있는 것처럼 보이는 효과이다. 이상의 내용은 실험결과와 정반대로 해석을 하게 된다.

UV(광전자)나 고온(열전자) 처리시 금속 표면에서 전자 방출하는 데 있어, 한계 진동수가 존재하는 것에 관해서는 고전물리학의 입장은 수영장의 물로 해석



|한계 진동수에 관한 CM 해석|

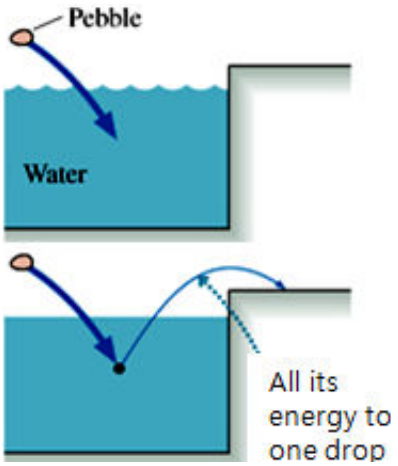
한다. 수영장내 물방울을 풀장 밖으로 내보내기 위해서는 mgh 만큼의 최소한 에너지가 필요하다는 것을 일함수가 나타나는 이유로 파악하였다.

이상이 해석을 바탕으로 파동이라고 했을 때 나타나는 몇가지 의문점을 정리하면 다음과 같다. 첫째는 파장 문제이다. 어떤 파장이라도 장시간 비추거나 밝게 비추면 충분한 에너지가 축적되어 전자 방출될 수 있어야 하는 것이 기존 입장이었다. 그러나 실제 실험에서는 특정 파장이하에서만 광전자가 방출되었으며, 한계파장 보다 에너지가 작은 입사광은 아무리 오래 비춰도 광전자를 방출하지 않았다. 두 번째 문제는 조도 문제이다. 빛의 세기가 강할수록 튀어나오는 전자의 에너지가 커져야 했다. 그러나 튀어나오는 단일 전자의 에너지는 조도에 상관없이 진동수에 의존한 결과를 얻었다. 마지막으로 방

출시간 문제이다. 약한 세기의 빛은 전자가 튀어나오는 데 시간이 오래 걸려야 한다. 그러나 빛의 세기에 상관없이 튀어나오는 시간은 일정하고 전자의 개수만 감소한다. 대신 입사광의 진동수가 크면 튀어나온 전자의 속도는 증가한다.

▌아인슈타인의 해석

이상의 광전효과를 입자로 해석한다면 쉽게 이해할 수 있다. 이는 아인슈탄의 가설(postulate)로 해결되었다. 빛의 에너지는 hν라는 불연속인 양(qunata)로 구성되어 있으며, 빛의 흡수/방출시에는 완전한 양(qunata)만을 흡수/방출하여 단일전자에 모든 에너지를 담아 보낸다고 가정하였다. 아인슈타인의 해석을 CM의 수영장 해석과 비교해 보면, 풀장에 조약돌을 던졌다고 하면 CM 관점은 조약돌의 에너지가 물분자와 공유를 하고 수면 내 작은 파동만 발생한다는 것이다. QM 관점에서는 하나의 조약돌은 자신이 가진 모든 에너지를 하나의 물방울에게만 전달하고 그 물방울이 풀장 밖으로 쉽게 벗어날 수 있다는 것이다.



|CM, QM의 조약돌 모델|

빛을 에너지 덩어리인 광입자(광자, photon)이라고 본 아인슈타인 관점에서 실험을 재해석하면 광전효과를 보다 쉽게 이해할 수

있게 된다. 입사광의 세기가 증가하고 진동수가 일정하다는 것은 던지는 조약돌의 개수가 증가하되 일정한 속도로 던졌다는 것이다. 당연히 튀어나오는 전자수는 증가하되 튀어나온 전자의 에너지는 동일하게 된다. 반대로 세기를 일정하게 하고 진동수를 증가시키면, 동일한 개수의 조약돌을 더 세게 던졌으므로 단일 전자에너지는 증가하고 발생된 전자는 일정하게 된다. 이는 실험 결과와 동일하다.

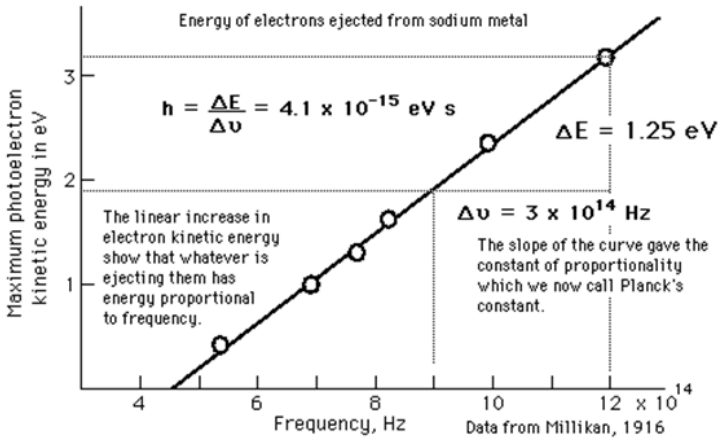
전자 방출에 필요한 에너지는 아인슈타인의 일함수 개념으로 정립되었다. 즉 튀어 나오는데 필요한 에너지($1/2mv^2$)는 입사광과 광전자가 지닌 에너지의 편차($h\Delta\nu=h\nu-h\nu_0=h\nu-W$)로 해석하였다. 만약 전자가 튀어나오지 않는다면 입사한 빛의 에너지가 일함수 보다 작거나 거의 일치한 경우이고, 그 이상의 에너지가 공급되어야 운동하는 자유 광전자를 발생시킬 수 있다. 일함수는 금속별로 차이가 나며, 세슘(Ce)는 2.1 eV로 민감하며 백금(Pt)는 6.35 eV로 둔감하다. 따라서 빛에 민감한 세슘은 광센서를 만드는데 쉽게 활용할 수 있다.

여기서 아인슈타인의 업적을 정리하자면, 그의 광량자설에 의해 $E=h\nu$이므로 광량자의 운동량 $P(=h\nu/c)$는 h/λ가 된다. 따라서 빛도 입자로서 파장에 반비례하는 운동량을 가지고 있다는 것이 된다.

▌밀리칸의 실험

아인슈타인의 일함수 해석을 모두가 만족했던 것은 아니다. 밀리컨

(Robert Milikan, 1868-1953)은 아인슈타인의 해석이 틀림을 증명하기 위해 10년간 반복실험을 했다. 진동수를 변화(⊿ν)시켜가면서 광전자 발생으로 인한 에너지 편차(⊿E)를 2차원 좌표로 나타내는 실험이었다. 결론은 늘 직선이 나타났다. 그 직선의 기울기(⊿E/⊿ν)가 의미하는 바가 바로 플랑크 상수인 h를 말하는 것이었다. 현재의 값과 약 0.5%의 오차밖에 없을 정도로 정교한 실험이었다. 그는 고전물리학에 입각하여 문제를 해석하려고 하였으나, 결론적으로는 에너지가 양자화 되어있다는 플랑크의 중요 상수값을 밀리칸의 실험으로 증명하게 된 셈이었다. 당연히 아인슈타인의 일함수도 입증되었다.



|밀리컨의 플랑크 상수 증명|

▌ 등장인물 살펴보기

하인리히 헤르츠(Heinrich Hertz, 1857-1894)
독일의 물리학자이다. 일상에서 자주 쓰는 주파수의 단위인 헤르츠는 이 사람의 이름에서 따올 정도로 전자기학에 지대한 업적을 남겼다. 무선통신의 기초 원리를 제시하였으며, 아인슈타인이 설명하게 된 광전효과를 처음 발견한 인물이기도 하다.

토마스 에디슨(Thomas Edison, 1847-1931)
미국의 발명가이다. 전등 발명을 포함한 특허수가 천 가지가 넘을 정도로 많은 발명을 하였다. 전구실험 중에 발견한 에디슨 효과는 열전자 현상 연구와 진공관에 연구에 응용되어 전자산업 발달에 기여하였다. 그는 대학의 강의를 경멸하였고, 99%의 노력과 1% 영감을 강조했다.

조제프 톰슨(Joseph Tomson, 1856-1940)
영국의 물리학자이다. 전자와 이성질체의 발견으로 유명하며, 질량분석기를 발명하였고, 전자를 발견한 업적으로 1906년 노벨 물리학상을 받았다. 그의 러더퍼드(Rutherford), 오펜하이머(Oppenheimer), 브래그(Bragg), 보른(Born) 등 유명한 제자를 많이 배출하였다.

필립 레너드(Philipp Lenard, 1862-1947)
독일의 헝가리계 물리학자이다. 음극선에 관한 연구를 통해 1905년 노벨 물리학상을 받았다. 그는 나치주의 지지자였으며, 헝가리인임을 자랑스러워했다. 헤르츠와 톰슨의 관찰을 실험적으로 정밀하게 증명하여 광전효과 분야의 중요한 역할을 하였다.

로버트 밀리컨(Robert Milikan, 1868-1953)

미국의 물리학자이다. 밀리컨의 기름방울실험을 고안하여 전자의 기본전하량을 측정하였다. 광전효과에 관한 정량적인 연구를 수행하여 플랑크 상수 값을 구하였다. 기본 전하량과 광전효과에 관한 연구로 1923년 노벨 물리학상을 수상하였다.